

07;12

Бистабильный режим генерации второй гармоники фемтосекундными импульсами

© Т.М. Лысак, В.А. Трофимов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119899 Москва, Россия

(Поступило в Редакцию 24 ноября 2000 г.)

Продемонстрирована возможность управления эффективностью генерации второй гармоники фемтосекундными импульсами. С помощью фазового сдвига в определенном сечении среды реализуется переключение с низкоэффективного состояния генерации на высокоэффективное состояние (и наоборот). Контрастность переключения по эффективности преобразования достигает 4 (и более) единиц, а по пиковой интенсивности в центре импульса — 9 единиц. На основе обнаруженного эффекта предлагается новый класс оптических переключателей.

Проблема высокоэффективной генерации второй гармоники (ГВГ) фемтосекундными импульсами остается нерешенной до настоящего времени [1], несмотря на многолетние усилия различных авторов [2–4]. Причина этого, как известно, заключается в проявлении самовоздействия волн, вызванного кубической нелинейностью среды, действие которой для фемтосекундных импульсов становится сравнимой с действием квадратичной нелинейности. В результате дополнительного набег фаз взаимодействующих волн из-за их самовоздействия происходят сбой оптимального соотношения фаз и, как следствие этого, прекращение режима перекачки энергии во вторую гармонику.

Используя инварианты (величины, сохраняющие свое значение в процессе взаимодействия волн) процесса ГВГ, в [5] было показано, что эффективность генерации в случае фазового и группового синхронизма определяется отношением безразмерных констант, характеризующих квадратичную и кубическую нелинейность. При этом эффективность монотонно зависит от него: чем больше влияние кубической нелинейности, тем ниже эффективность генерации.

Качественно новое свойство процесса ГВГ появляется, если рассматривать генерацию при отсутствии условия фазового синхронизма. Так, проведенный в [6] анализ показал, что в этом случае возможно существование двух устойчивых режимов генерации. Как следствие этого, самовоздействие волн при определенных условиях приводит к самопроизвольному периодическому переключению процесса генерации на высокоэффективную ветвь и достигается 60%-ная эффективность генерации [7]. В настоящей работе показано, что процессом ГВГ можно управлять, переключая режим генерации из одного устойчивого состояния в другое за счет внесения фазового сдвига взаимодействующих волн в определенном сечении среды. Существенно, что при определенных условиях имеет место высокая контрастность этих состояний. Это открывает возможность реализации оптического переключателя (процессора) с потенциально малым временем переключения, которое определяется

временем установления кубической нелинейности. Таким образом, при использовании электронного механизма нелинейности реально осуществить переключения из одного состояния в другое за 10–50 fs (или менее).

В предположении, что дифракционная длина значительно превосходит длину нелинейной среды, система безразмерных уравнений, описывающая процесс ГВГ фемтосекундным импульсом с учетом его самовоздействия, имеет следующий вид [2]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_1}{\partial z} + iD_1 \frac{\partial^2 A_1}{\partial \eta^2} + i\gamma A_1^* A_2 e^{-i\Delta k z} \\ + i\alpha_1 A_1 (|A_1|^2 + 2|A_2|^2) = 0, \quad 0 < z \leq L_z, \\ \frac{\partial A_2}{\partial z} + \nu \frac{\partial A_2}{\partial \eta} + iD_2 \frac{\partial^2 A_2}{\partial \eta^2} + i\gamma A_1^2 e^{i\Delta k z} + i\alpha_2 A_2 \\ \times (2|A_1|^2 + |A_2|^2) = 0, \quad \alpha_2 = 2\alpha_1 = 2\alpha. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь η — безразмерное время в сопровождающей импульс основной волны системе координат; z — нормированная продольная координата;

$$D_j \sim -0.5 \frac{\partial^2 \bar{k}_j}{\partial \bar{\omega}_j^2}$$

— коэффициенты, характеризующие дисперсию второго порядка; \bar{k}_j , $\bar{\omega}_j$ — соответственно размерное волновое число и частота j волны; γ — коэффициент нелинейной связи взаимодействующих волн; $\Delta k = k_2 - 2k_1$ — безразмерная расстройка их волновых чисел; α_j — коэффициенты самовоздействия волн; A_j — комплексные амплитуды гармоник ($j = 1, 2$), нормированные на максимальную амплитуду первой гармоники в начальном сечении среды ($z = 0$). Параметр ν пропорционален разности обратных величин групповых скоростей волн второй гармоники и основной частоты, L_z — длина нелинейной среды.

На входе в нелинейную среду задается начальное распределение импульса основной частоты

$$A_1(z = 0, \eta) = A_0(\eta), \quad 0 \leq \eta \leq L_t, \quad (2)$$

L_t — безразмерное время, в течение которого анализируется рассматриваемый процесс; амплитуда волны второй гармоники в этом сечении равна нулю: $A_2(z=0, \eta)=0$.

В качестве начального распределения импульса основной волны $A_0(\eta)$ в физических экспериментах используется гауссов импульс

$$A_0(\eta) = A_{10} \exp(-((\eta - L_t/2)/\tau)^2/2). \quad (3)$$

В выбранной нами нормировке параметров безразмерная амплитуда основной частоты $A_{10} = 1$.

Процесс ГВГ в условиях самовоздействия волн обладает рядом инвариантов [5], значения которых необходимо контролировать при компьютерном моделировании процесса ГВГ. Нами использовались консервативные разностные схемы, сохраняющие значения инвариантов.

Эффективность преобразования энергии волны основной частоты в энергию волны второй гармоники оцениваем с помощью следующей величины:

$$\Theta(z) = \int_0^{L_1} |A_2(z, \eta)|^2 d\eta / \int_0^{L_1} |A_1^0(\eta)|^2 d\eta. \quad (4)$$

Численные эксперименты проводились для случая группового синхронизма взаимодействующих волн ($\nu = 0$).

Как известно, эффективность преобразования $\Theta(z)$ сначала плавно возрастает, изменяясь от нулевого значения до некоторого максимального значения. В этом случае генерация происходит в пределах области первого синхронизма, в которой разность фаз взаимодействующих волн меньше π . Затем наблюдаются колебания эффективности в окрестности некоторого ее среднего значения. Оно в свою очередь определяется значениями параметров задачи и быстро уменьшается с ростом влияния самовоздействия (параметр α).

Вместе с тем значительное увеличение, равно как значительное снижение, эффективности преобразования на заданном расстоянии от входа в среду может быть достигнуто как результат сдвига фаз взаимодействующих волн внутри среды при достаточно большом преобладании кубичной нелинейности над квадратичной. При этом изменение знака сдвига в ряде случаев может приводить к значительной разности получаемых эффективностей преобразования. Заметим, что сдвиг фаз взаимодействующих волн достигается нами за счет одновременного внесения одинакового значения фазы $\Delta\varphi = \text{const}$ в волны основной и второй гармоники. Именно это значение $\Delta\varphi$ представлено ниже в подписях к рисункам.

Прежде всего следует подчеркнуть, что при относительно небольшом различии безразмерных коэффициентов, характеризующих квадратичную и кубичную нелинейности ($\alpha \sim 2\gamma$), переключением удастся лишь поддерживать высокое значение эффективности преобразования без какого-либо заметного ее увеличения. Этот вывод справедлив как для достаточно длинных импульсов (рис. 1, *a*), так и для коротких импульсов

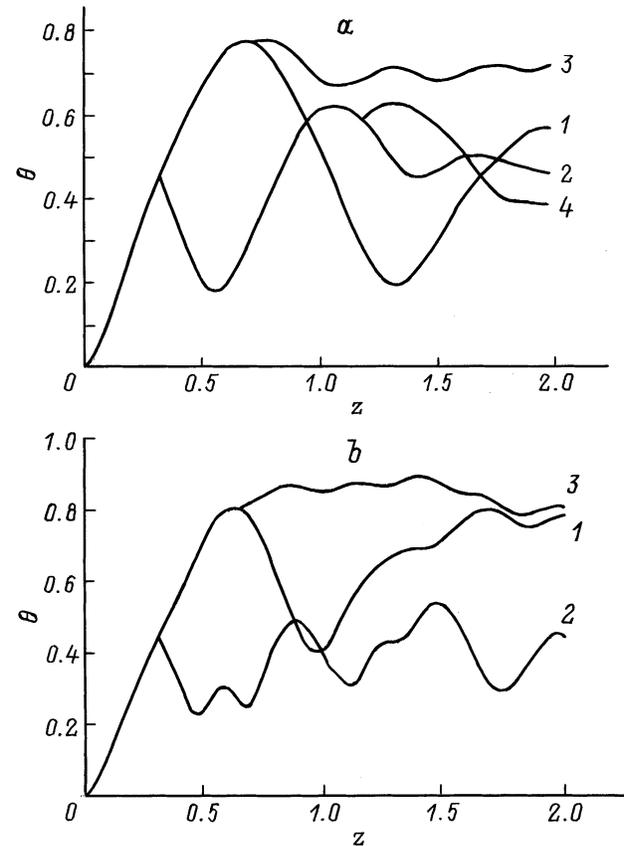


Рис. 1. Эволюция эффективности ГВГ без переключения (1) и с переключением в различных точках среды (2–4), $\alpha = 8$, $\gamma = 4$, $\Delta k = -2.35$, $\nu = 0$. *a* — $D_1 = D_2 = 0.0000625$, $\tau = 4$; *b* — $D_1 = D_2 = 10^{-3}$, $\tau = 0.1$.

(рис. 1, *b*), испытывающих существенное воздействие дисперсии второго порядка. Преимущество же в переключении режима генерации на высокоэффективную ветвь в данном случае заключается в относительно слабой зависимости коэффициента преобразования от длины среды.

Для практики наибольший интерес представляет ситуация существенного преобладания кубичной нелинейности над квадратичной при генерации второй гармоники фемтосекундными импульсами. В этом случае удается достичь высокой эффективности генерации при $\Delta k \neq 0$ за счет переключения системы. В качестве иллюстрации приведен рис. 2, на котором показана эволюция эффективности преобразования при распространении импульса внутри среды без переключения (кривая 1), а также для одно- и двукратного переключения (кривые 2–4). Первое переключение приводит к существенному увеличению эффективности преобразования (кривые 1 и 2 на графике зависимости эффективности от z). Выбором соответствующего сечения для второго переключения можно как существенно ухудшить эффективность генерации (кривая 3), так и осуществить поддержание эффективности на достигнутом уровне (кривая 4).

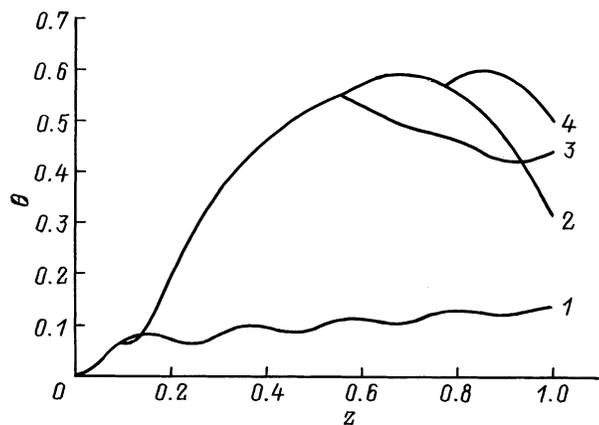


Рис. 2. Эффективность ГВГ для параметров $\alpha = 16$, $\gamma = 4$, $\Delta k = -2.0$, $D_1 = D_2 = 0.001$, $\nu = 0$, $\tau = 10$ без переключения системы в высокоэффективное состояние (1) и при внесении фазового сдвига $\Delta\varphi$: 2 — -3 , 3 — -1.5 , 4 — -2.5 в соответствующих сечениях среды. Сечения внесения фазового сдвига соответствуют раздвоению кривых.

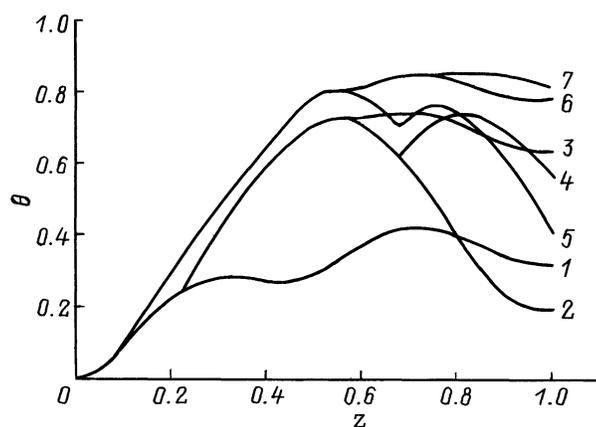


Рис. 3. Эффективность ГВГ для параметров $\alpha = 10$, $\gamma = 4$, $\Delta k = -2.35$, $\nu = 0$, $D_1 = D_2 = 0.0000625$, $\tau = 4$ без переключения системы в высокоэффективное состояние (1) и при внесении фазового сдвига $\Delta\varphi = -1$ (2); двойного фазового сдвига $\Delta\varphi = -1$ и $\Delta\varphi = \pi$ (3–6); тройного фазового сдвига $\Delta\varphi = -1$, $\Delta\varphi = \pi$ и $\Delta\varphi = \pi$ (7) в соответствующих сечениях. Сечения внесения фазового сдвига соответствуют раздвоению кривых.

Заметим, что аналогичные результаты имеют место и при других значениях α и γ , в частности при $\alpha = 10$, $\gamma = 4$. Однако эффективность переключения режима генерации для этих параметров несколько ниже из-за более высокого значения преобразуемой во вторую гармонику энергии, достигаемой при условии фазового синхронизма. Данное утверждение иллюстрируют рис. 3–4, на которых приведены результаты компьютерного моделирования для значений параметров $\alpha = 10$, $\gamma = 4$, $\Delta k = -2.35$, $D_1 = D_2 = 0.0000625$, $\tau = 4$. В ряде точек внутри среды (точки раздвоения кривых) производилось переключение для разных направлений сдвига

фаз, обеспечивающих максимально возможное увеличение (рис. 3) или отклонение (соответственно увеличение и уменьшение; рис. 4) значений эффективности от невозмущенного (в смысле отсутствия внесения сдвига фаз) значения. Изменение фазы волны производится как вблизи входа в среду, так и в ее глубине.

Как следует из рис. 3, можно достичь 90%-ной эффективности преобразования за счет введения в заданных сечениях среды сдвига фаз взаимодействующих волн. Важно подчеркнуть, что максимальная разность значений эффективности при изменении направления сдвига фаз достигается для точек переключения, расположенных в окрестности первой четверти отрезка (рис. 4). При этом наибольшее значение эффективности достигается для положительного сдвига фаз, а наименьшее — при отрицательном сдвиге.

Слишком раннее (рис. 4, *a*), как и слишком позднее (рис. 4, *d*), переключение существенно снижает эффект от изменения сдвига фаз в точке переключения. Существенно, что если при слишком раннем переключении эффективность преобразования на конце отрезка снижается, то для слишком позднего переключения наблюдается увеличение эффективности независимо от направления сдвига. В обоих случаях разница значений эффективности на конце отрезка для переключенных волн достаточно мала. Следовательно, и контрастность переключения будет малой. Однако для раннего переключения существует область в середине отрезка, где наблюдается большая контрастность значений эффективности для переключенных состояний. При сдвиге точки переключения в сторону конца отрезка контрастность уменьшается и становится незначительной для самого позднего переключения.

Вместе с тем анализ изменения формы импульса при его распространении в глубь среды показывает, что лишь раннее переключение (рис. 4, *a*) способствует сохранению формы распространяющихся импульсов, вследствие чего практически по всей ширине импульса наблюдается единый режим генерации (рис. 5, *b, c*). При этом можно достичь существенного (в несколько раз) различия пиковых интенсивностей основной волны и волны второй гармоники (рис. 5, *b, c*, сечения $z = 0.6$). В отсутствие переключения (рис. 5, *a*), так же как и при достаточно позднем переключении (рис. 5, *d, e*), явление самофокусировки приводит к тому, что лишь в ближайшей к центру импульса области наблюдается единый режим генерации и соответствующая контрастность интенсивностей. Световые импульсы разбиваются на несколько субимпульсов. В результате этого снижается максимально достижимая контрастность значений эффективности генерации по сравнению со случаем раннего переключения.

В заключение данной работы сформулируем некоторые выводы, которые следуют из представленных выше результатов по ГВГ фемтосекундными импульсами, учитывающими самовоздействие волн. Во-первых, для достижения высокой эффективности генерации следует

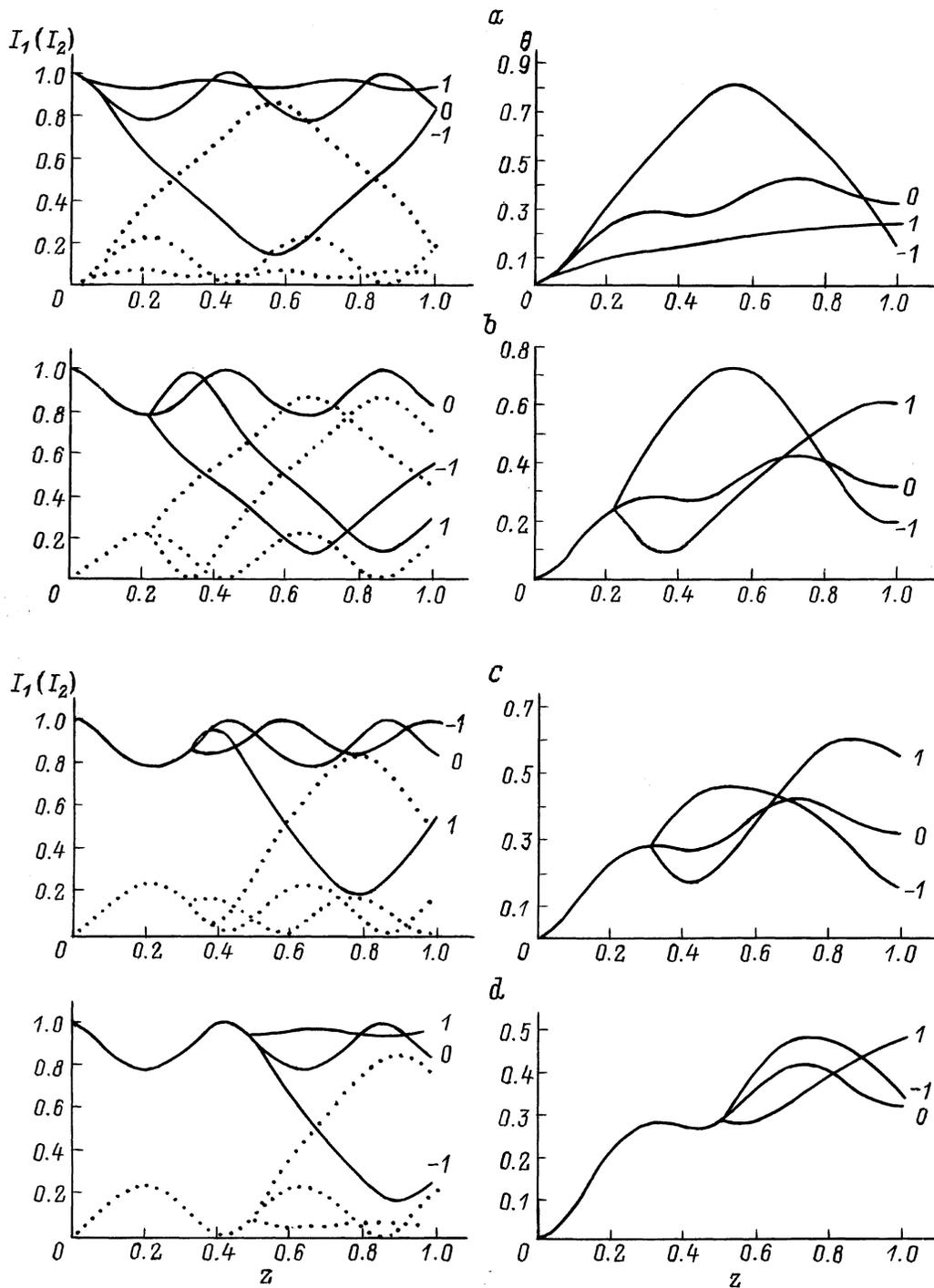


Рис. 4. Зависимость пространственных распределений эффективности (справа) и интенсивности волн основной $I_1(z) = |A_1(z, \eta = L_t/2)|^2$ (сплошные кривые) и второй $I_2(z) = |A_2(z, \eta = L_t/2)|^2$ (пунктир) гармоник в центре импульса (слева) от точки переключения и направления сдвига фаз в точке переключения: $z = 0.05$ (а), 0.22 (б), 0.32 (в), 0.5 (д). Цифры у кривых — значения сдвига фаз в точке переключения. $\alpha = 10$, $\gamma = 4$, $\Delta k = -2.35$, $\nu = 0$, $D_1 = D_2 = 0.0000625$, $\tau = 4$.

отказаться от осуществления условия фазового синхронизма, применяемого в случае ГВГ более длинных импульсов (пикосекундных и более длинных). Во-вторых, вводя в определенных сечениях сдвиг фаз взаимодействующих волн, можно достичь 80%-ной (и более) эффек-

тивности генерации. В-третьих, при достижении высокой эффективности генерации существует возможность контролировать форму импульса второй гармоники. В частности, можно реализовать как генерацию импульса, обладающего гауссоподобной формой, так и импульса,

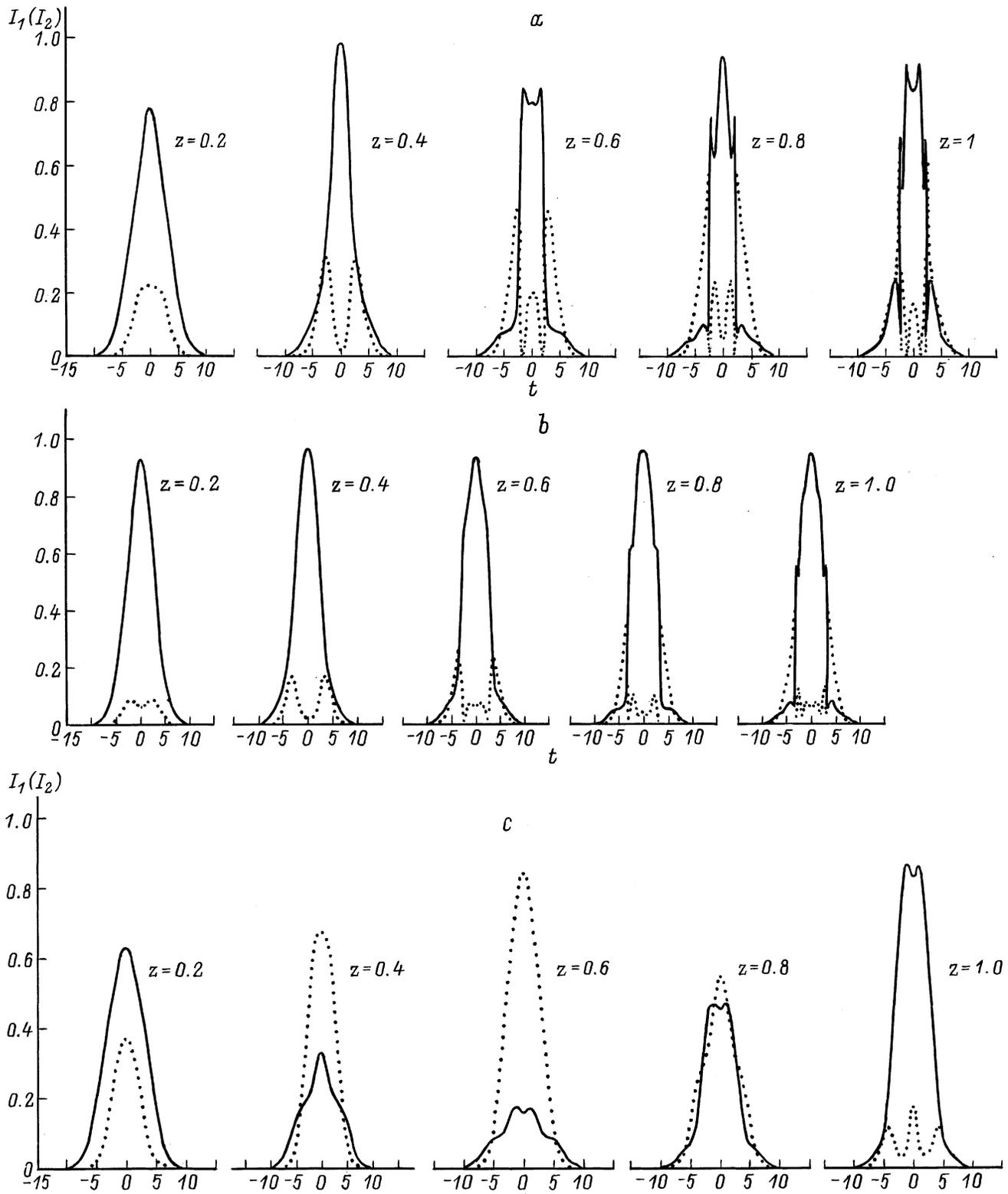


Рис. 5. Изменение формы импульса при распространении в глубь среды для случая отсутствия переключений (a); переключения в точке $z = 0.05$ и сдвиге фаз, равном 1 (b) и -1 (c); переключения в точке $z = 0.5$ и сдвиге фаз, равном 1 (d) и -1 (e). $\alpha = 10$, $\gamma = 4$, $\Delta k = -2.35$, $D_1 = D_2 = 0.0000625$, $\nu = 0$, $\tau = 4$.

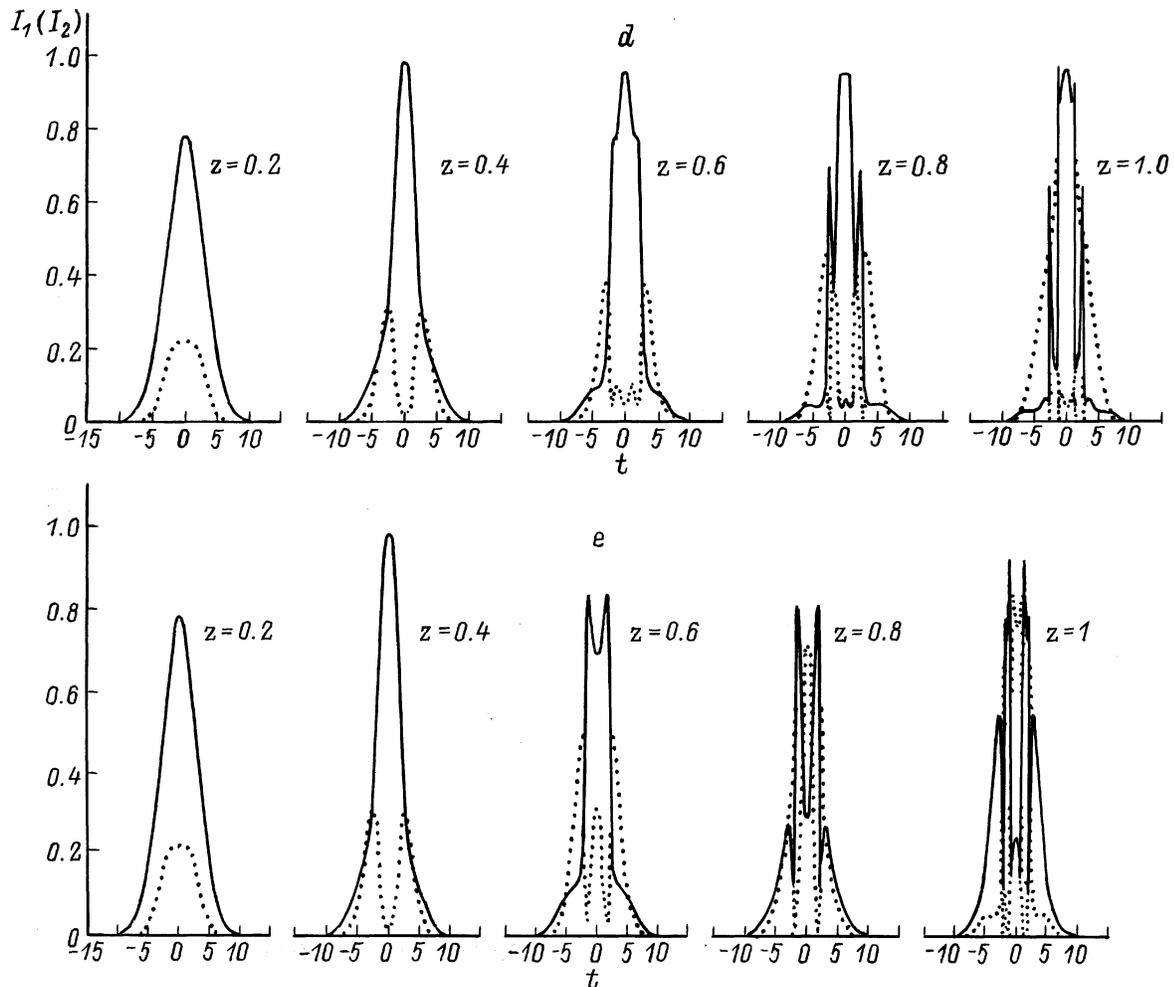


Рис. 5 (продолжение).

имеющего провал в распределении интенсивности на оси. Это позволяет говорить о генерации разных мод импульса второй гармоники.

В-четвертых, используя переключения режима генерации, получаем возможность реализации бистабильного режима генерации с различающимися в несколько раз значениями эффективности и пиковой интенсивности гармоник. Это позволяет построить новый класс оптически бистабильных систем, обладающих высокой эффективностью и скоростью переключения в фемтосекундном диапазоне при осуществлении внесения дополнительного фазового сдвига за аналогичное время. В результате открываются новые возможности для построения оптического процессора, работающего на предложенном принципе.

Следует также отметить, что возможным препятствием к достижению высокоэффективной ГВГ фемтосекундных импульсов, обладающих очень большой интенсивностью, может оказаться модуляционная неустойчивость. Однако анализ ее влияния на процесс генерации выходит за рамки данной работы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 9901-01233) и программы "Университеты России-фундаментальные исследования" (грант № 992409).

Список литературы

- [1] *Steinmeyer G., Sutter P.H., Gallmann L. et al. // Science. 1999. Vol. 286. P. 1507–1560.*
- [2] *Разумихина Т.Б., Телегин Л.С., Холодных А.И., Чиркин А.С. // Квантовая электроника. 1984. Т. 11. № 10. С. 2026–2030.*
- [3] *Ho P.P., Wang Q.Z., Alfano R.R. // Optics Lett. 1991. Vol. 16. P. 970–972.*
- [4] *Ditmire T., Rubenchik A.M., Eimerl, Perry M.D. // JOSA B. 1996. Vol. 13. P. 649–652.*
- [5] *Иванова И.С., Магницкий С.А., Трофимов В.А. // Вестник Московского ун-та. Сер. Вычислит. матем. и киберн. 2000. № 1. С. 21–25.*
- [6] *Лысак Т.М., Трофимов В.А. // ЖВМи МФ. 2001. Т. 41. N 8.*
- [7] *Lysak T.M., Trofimov V.A. // Technical Program of Intern. Conf. LO'2000. St.Petersburg, 2000. P. 48.*